

В.А. Агеенко, М.Н. Тавостин

# ИСПЫТАНИЕ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Представлены методика определения реологических параметров мерзлых грунтов в лабораторных условиях при трехосном сжатии, необходимая аппаратура и результаты испытаний. В качестве испытуемого материала использовались образцы мерзлого грунта с участка Харасавейского газоконденсатного месторождения с глубин от 10 до 50 м, в основном суглинки, глины и пески. Для проведения экспериментов в условиях трехосного сжатия использовались приборы компании «НПП Геотек». Они позволяют проводить эксперименты в режиме автоматического нагружения, поддержания и регистрации процессов деформирования в течении длительного времени. Методикой испытаний для определения реологических свойств в условиях длительного трехосного сжатия предусматривалось ступенчатое нагружение. Интервал между ступенями составлял 24 ч. Эксперименты продолжались до разрушения образца. В результате проведенных испытаний определены прочностные, деформационные и реологические параметры для мерзлых грунтов при температурах  $-3^{\circ}\text{C}$  и  $-6^{\circ}\text{C}$ . Результаты испытаний удовлетворительно описываются различными моделями, такими как Кулона-Мора, Друккера-Прагера, Треска и др. Описанные эксперименты по испытанию мерзлых грунтов в условиях трехосного сжатия были опробованы ООО «Газпром геотехнологии» при проектировании подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах для захоронения буровых отходов.

Ключевые слова: испытание мерзлых грунтов, трехосное сжатие, реологические характеристики, геомеханика.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-122-128

На большей части территории России распространено сезонное промерзание грунтов, а более 50% занимают многолетнемерзлые породы. В связи с освоением этих территорий появляются проблемы при проектировании и строительстве подземных сооружений. Необходимость изучения механических свойств мерзлых грунтов является базой для решения задач геомеханики подземных сооружений.

С увеличением глубины подземных сооружений появляется необходимость

определения механических свойств мерзлых грунтов в условиях трехосного сжатия, наиболее объективно отражающего состояние породного массива. К таким сооружениям можно отнести комплекс объектов, связанных с разработкой нефтегазовых месторождений в условиях криолитозоны (подземные резервуары для захоронения буровых отходов, скважины различного назначения и т.д.), а также обводненные грунтовые массивы, подвергнутые искусственной заморозке с целью безопасного ведения

горных работ в условиях городского подземного строительства.

Свойства мерзлых грунтов, в том числе и реологические, достаточно хорошо изучены и существует нормативная документация, регламентирующая методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости полускальных, дисперсных и мерзлых грунтов при их исследовании (ГОСТ 12248-2010). Основной целью полученных в нем характеристик было проведение расчетов по строительству наземных и приповерхностных объектов в условиях одноосного сжатия.

Вместе с тем у пользователей современных программных продуктов, применяемых в инженерных расчетах для оценки устойчивости подземных сооружений (ABAQUS, ANSYS, PLAXIS), позволяющих оценивать напряженно-деформированное состояние грунтов, часто возникают трудности по определению исходных данных физико-механических характеристик мерзлых грунтов.

Целью настоящей работы было создание методики лабораторного определения реологических характеристик мерзлых грунтов в условиях трехосного сжатия, выбор испытательной аппаратуры и проведение тестовых испытаний.

Сущность метода для определения реологических характеристик подразумевает проведение испытаний в режиме ползучести в течение длительного времени. За основу принят способ ступенчатого нагружения на установке трехосного сжатия, дающей возможность бокового расширения образца в условиях осесимметричного статического нагружения при  $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ . Где  $\sigma_1$  — переменное осевое напряжение;  $\sigma_2 = \sigma_3$  — постоянные боковые напряжения.

Первоначально образец нагружается всесторонним давлением, создающим напряжения  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ . Значение этих напряжений составляет планируемую в

эксперименте величину как значение постоянного минимального напряжения  $\sigma_2 = \sigma_3$ , которое рассчитывалось по формуле:

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \gamma \cdot H,$$

где  $\gamma$  — удельный вес грунта, Н/м<sup>3</sup>;  $H$  — глубина исследуемого породного массива, м.

Выдержка напряжений  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$  производится до полного затухания деформаций.

Далее производится увеличение осевого напряжения  $\sigma_1$  на величину  $\Delta\sigma_1$ . Значения  $\sigma_2 = \sigma_3$  в процессе эксперимента остаются постоянными величинами. Продолжительность ступени составляет 24 ч. Величина нагружения на ступенях рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta\sigma_1 = \frac{\sigma_{сж} \cdot n}{10}$$

где  $\sigma_1$  — условно-мгновенное значение предела прочности грунта при трехосном сжатии, кПа;  $n$  — номер ступени.

Испытания производятся до разрушения образца или перехода в стадию прогрессирующей ползучести. В случае отсутствия этих условий эксперимент производится до достижения осевой деформации 20%.

Испытательное оборудование для проведения экспериментов при трехосном сжатии в условиях длительное нагружения должно обеспечивать следующие условия:

- создание осевой нагрузки, позволяющей разрушить образец (не менее 15 кН);

- создание бокового напряжения  $\sigma_2 = \sigma_3$  (не менее 0,4 МПа) и постоянство его на протяжении всего эксперимента;

- обеспечение непрерывной автоматической записи осевого напряжения  $\sigma_1$  и бокового давления  $\sigma_2 = \sigma_3$ ;

- работа при отрицательной температуре до  $-10^\circ \text{C}$ ;



Рис. 1. Общий вид установки трехосного сжатия испытательного комплекса «АСИС-2»

Fig. 1. General view of triaxial compression plant of ASIS-2 testing system

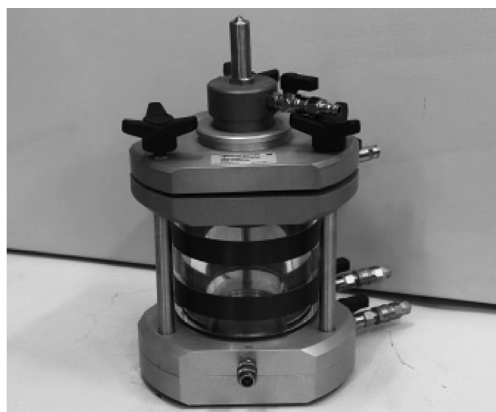


Рис. 2. Общий вид камеры трехосного сжатия

Fig. 2. General view of triaxial compression cell

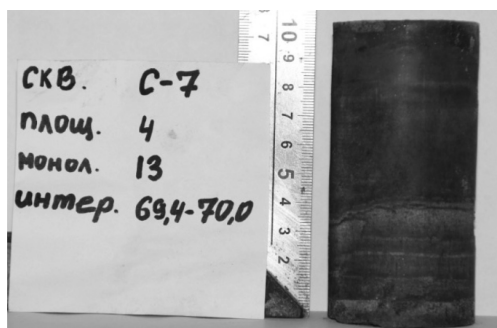


Рис. 3. Образец скважины С-7, подготовленный для испытаний (площадь № 4, монолит 13, интервал 69,4–70,0 м)

Fig. 3. Prepared specimen from hole S-7 (site 4, block sample 13, interval 69.4–70.0 m)

- возможность измерения продольной деформации грунта;
- возможность измерения объемной деформации.

Поперечная деформация  $\varepsilon_3$  рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_3 = \frac{(\varepsilon_v - \varepsilon_1)}{2}$$

где  $\varepsilon_v$  — относительная объемная деформация образца;  $\varepsilon_1$  — относительная вертикальная деформация образца грунта.

Для проведения испытаний по вышеперечисленной методике использовался испытательный лабораторный комплекс «АСИС», изготовленный ООО НПП «Геотек» (Россия). Испытательный комплекс включает в себя установку, созданную на базе нагружающей рамы 1, камеры трехосного сжатия 2 (рис. 1). Комплекс снабжен устройством стабилизации бокового давления 3, которое контролируется датчиком давления 4. В качестве рабочей жидкости для создания бокового давления используется водно-спиртовой раствор, который не замерзает при отрицательных температурах.

Общий вид камеры бокового давления представлен на рис. 2.

Испытательный лабораторный комплекс «АСИС» размещается в морозильную камеру, которая должна обеспечивать стабильную отрицательную температуру. В качестве испытуемого материала использовались образцы мерзлого грунта с участка Харасавейского газоконденсатного месторождения, расположенного на полуострове Ямал, с глубин от 10 до 50 м — в основном суглинки, глины и пески. Образцы вырезались стальным режущим кольцом, как это регламентирует ГОСТ 12248-2010, размером 80×40 мм. Эксперименты проводились при температурах  $-3^\circ\text{C}$  и  $-6^\circ\text{C}$ .

Пример подготовленного для испытания образца приведен на рис. 3.

Поддержание постоянной отрицательной температуры в процессе испытания

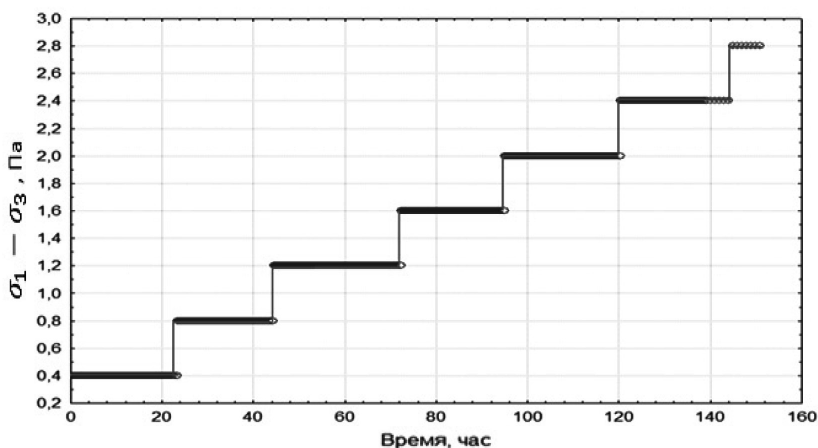


Рис. 4. Траектория нагружения в ходе эксперимента  
 Fig. 4. Path of loading in the tests

обеспечивалось в передвижной испытательной лаборатории с диапазоном температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Перед проведением испытания образец помещался в герметичную оболочку. Оболочка изготавливалась из специализированной трубчатой резины, выпускаемой изготовителем оборудования. Оболочка не вызывает бокового отпора при деформировании образца. Далее образец помещался в камеру. Камера заполнялась жидкостью (водно-спиртовой раствор), имеющей температуру заморозания  $-15^{\circ}\text{C}$ . После вышеперечис-

ленных действий выполнялась дегазация камеры, необходимая для исключения неточности определения объемной деформации образца. В процессе испытаний производилась корректировка осевого напряжения ввиду расширения поперечного сечения образца. Результаты испытаний обрабатывались в программе STATISTICA.

Пример изменения напряженного состояния образца мерзлого грунта во времени представлен на рис. 4. Показан график ползучести мерзлого грунта при условиях  $T = -3^{\circ}\text{C}$ , начальное напряже-

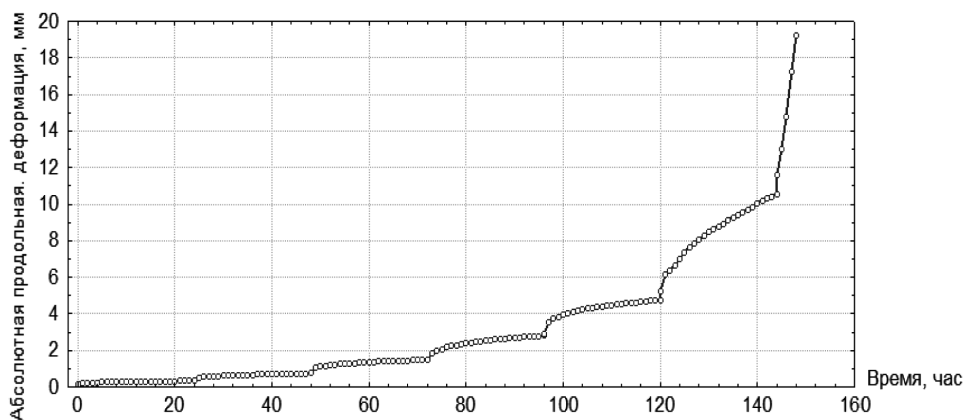


Рис. 5. График ползучести мерзлых грунтов  
 Fig. 5. Frozen ground creep curve

ние  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0,4$  МПа, величина ступени нагружения  $\Delta\sigma_1 = 0,4$  МПа продолжительность ступени 24 ч. Переход в прогрессирующую ползучесть произошел при величине девиатора напряжений  $(\sigma_1 - \sigma_3) = 2,8$  МПа.

Проведение экспериментов для определения реологических характеристик на установке трехосного сжатия в значительной мере позволяет расширить возможности инженерных расчетов.

Приведенное в работе описание экспериментов выполнялось для расчета устойчивости подземных резервуаров, сооружаемых в мерзлых породах при использовании их для захоронения буровых отходов. Строительство подземных резервуаров осуществляется без доступа человека по скважинной технологии, что создает определенные трудности по расчету их устойчивости, поскольку данные подземные сооружения являются незакрепленными, и окружающий породный массив подвержен тепловому воздействию от продукта хранения, существенным образом изменяющим его физико-механические свойства.

Выполнением таких расчетов занимается специализированная организация ООО «Газпром геотехнологии». Расчеты выполняются в сертифицированном программном комплексе Abaqus, и для описания реологического поведения многолетнемерзлых пород применяется расширенная модель Друккера-Прагера, где деформации описываются следующей зависимостью:

$$\dot{\varepsilon}^c = A \cdot (\sigma_{cp})^n \cdot t^m$$

где  $\dot{\varepsilon}^c$  — скорость деформаций ползучести,  $c^{-1}$ ;  $\sigma_{cp}$  — действующее напряжение, Па;  $t$  — время, с.

$A$ ,  $n$ ,  $m$  — коэффициенты, определяемые в экспериментах на ползучесть в условиях трехосного сжатия.

Согласно теории Друккера-Прагера значение действующего напряжения  $\sigma_{cp}$  определяется по формуле:

$$\sigma_{cp} = \frac{(P - q \cdot \operatorname{tg}\varphi)}{(1 - 0,5 \cdot \operatorname{tg}\varphi)},$$

где  $P$  — разность главных напряжений, Па;  $q$  — второй инвариант тензора напряжений, Па;  $\varphi$  — угол внутреннего трения, град.

Совершенно очевидно, что для реализации этой модели в расчетах необходимо учитывать компоненты напряжений.

По результатам испытаний рассчитывались необходимые входные параметры для численного моделирования. Описанный эксперимент по испытанию мерзлых грунтов в условиях трехосного сжатия для определения прочностных, деформационных и реологических характеристик был опробован ООО «Газпром геотехнологии» при проектировании подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах для захоронения буровых отходов, а также в НИИОСП им. Н.М. Герсевича при выполнении научно-исследовательских работ.

Представленный в данной статье опыт проведения экспериментов является неокончательным и требует продолжения методической и экспериментальной работы в данном направлении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеенко В. А. Разработка алгоритмов компьютерного проектирования наземного пространства в историческом центре Москвы и на присоединенных территориях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 5. — С. 358—359.
2. Савич О. И., Карпунин А. Н., Суринов С. Д. Использование отработанных камер скважинной гидродобычи песка для хранения жидких углеводородов и захоронения отходов бурения на нефтегазоконденсатных месторождениях полуострова Ямал // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 4. — С. 298—301.

3. Вакуленко И. С., Смирнов В. И., Сурин С. Д. Опыт строительства и перспективы использования подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах для захоронения отходов бурения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 1. — С. 222–229.

4. Агеенко В. А., Баклашов И. В. Разработка теории и моделирование процессов сводообразования в окрестности горизонтальной выработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 12. — С. 5–7.

5. Скворцов А. А., Воронова А. В., Журавлева Т. Ю. Методика оценки устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах / Сборник статей ежегодной конференции «Сергиевские чтения». — М., 2016. — С. 544–549.

6. Скворцов А. А., Воронова А. В., Журавлева Т. Ю. Моделирование геомеханического поведения подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах / Труды международного форума «Инженерные системы-2015», 6–7 апреля 2015 г. — М., 2015. — С. 163–173.

7. Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2003. Vol. 40. No. 2. Pp. 151–171.

8. El Hassan AitLaasri, Es-Said Akhouayri, DrisAgiliz, Abderrahman Atmani. Automatic detection and picking of P-wave arrival in locally stationary noise using.

9. Ильинов М. Д., Карташов Ю. М. Ускоренный метод определения реологических свойств горных пород // Записки Горного института. — 2011. — Т. 190. — С. 207–209.

10. Хохлов А. В., Определяющее соотношение для реологических процессов с известной историей нагружения // Известия Российской академии наук, Механика твердого тела. — 2008. — № 2. — С. 140–160. **ПЛАБ**

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Агеенко Валерий Александрович<sup>1</sup> — аспирант, e-mail: Valera.ageenko@mail.ru,

Тавостин Михаил Николаевич<sup>1</sup> — кандидат технических наук, доцент,

<sup>1</sup> МГИ НИТУ «МИСиС».

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 5, pp. 122–128.

V.A. Ageenko, M.N. Tavostin

### TRIAxIAL COMPRESSION TESTING OF RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF FROZEN GROUND

In underground construction in permafrost zones covering more than 50% of the territory of Russia, it is of the high concern to comprehensively study deformation, strength and rheological characteristics of frozen ground to make a framework for engineering designs. Majority of the modern analysis programs for underground structure stability with regard to stress state of surrounding rock mass require strength and rheological parameters to be determined by three-axial testing. This article presents a laboratory-scale procedure for three-axial compression of frozen soil, equipment and testing results. The test materials were specimens of frozen ground taken in Kharasavay gas-condensate field at a depth of 10 to 50 m, mostly, loam, clay and sand. The three-axial compression tests were performed on equipment of Geotek Science and Production, Russia. This triaxial-compression testing equipment allows automated loading, maintenance and recording of deformation processes for a long time. The long-term three-axial compression procedure included step-by-step loading. The step to step interval was 24 hours. The tests proceeded until failure of a specimen. As a result of the tests, the strength, deformation and rheological characteristics of frozen ground were determined under the temperatures of 30°C and 60°C. The test results conform with different models, e.g. Mohr–Coulomb, Drucker–Prager, Tresca, etc. The described three-axial compression test schemes for frozen ground were trialed by GAZPROM Geotechnologies in design projects of underground waste disposal in permafrost rocks.

Key words: frozen ground testing, triaxial compression, rheological characteristics, geomechanics.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-122-128

## AUTHORS

Ageenko V.A.<sup>1</sup>, Graduate Student, e-mail: Valera.ageenko@mail.ru,  
Tavostin M.N.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,  
<sup>1</sup> Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,  
119049, Moscow, Russia.

## REFERENCES

1. Ageenko V.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2012, no 5, pp. 358–359.
2. Savich O.I., Karpukhin A.N., Surin S.D. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2010, no 4, pp. 298–301.
3. Vakulenko I.S., Smirnov V.I., Surin S.D. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 1, pp. 222–229.
4. Ageenko V.A., Baklashov I.V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 12, pp. 5–7.
5. Skvortsov A.A., Voronova A.V., Zhuravleva T.Yu. *Sbornik statey ezhegodnoy konferentsii «Sergievskie chteniya»* (Сборник статей ежегодной конференции «Сергиевские чтения»), Moscow, 2016, pp. 544–549.
6. Skvortsov A.A., Voronova A.V., Zhuravleva T.Yu. *Trudy mezhdunarodnogo foruma «Inzhenernye sistemy–2015»*, 6–7 aprelya 2015 g. (Труды международного форума «Инженерные системы–2015», April 6–7, 2015), Moscow, 2015, pp. 163–173.
7. Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003. Vol. 40. No. 2. Pp. 151–171.
8. El Hassan AitLaasri, Es-Said Akhouayri, DrisAgliz, Abderrahman Atmani. *Automatic detection and picking of P-wave arrival in locally stationary noise using*.
9. Il'inov M.D., Kartashov Yu.M. *Zapiski Gornogo instituta*. 2011, vol. 190, pp. 207–209.
10. Khokhlov A.V. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk, Mekhanika tverdogo tela*. 2008, no 2, pp. 140–160.



---

## ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

---

### ПОВЫШЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭКОЛОГО- ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ (2018, № 1, СВ 3, 40 с.)

Коллектив авторов

Представлены исследования притоков метана из отбитого в очистном забое угля в зависимости от его фракционного состава, газопроницаемости и параметров сорбции, давления газа в поровом пространстве и длительности нахождения на забойном конвейере. Выполнено компьютерное моделирование процесса массопереноса на основе решения дифференциального уравнения в полярно-симметричной постановке задачи методом конечных элементов. Установлены существенное влияние на газообильность количества мелких фракций и факторы, влияющие на истираемость лотков тоннелей. Изложены технологические особенности комплексной дегазации разрабатываемого угольного пласта на стадии его предварительной дегазации (ППД), осуществляемой из горных выработок в процессе подготовки выемочного участка к интенсивной и безопасной обработке.

### IMPROVING INDUSTRIAL SAFETY AND ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC EFFICIENCY AT THE CONDUCT OF MOUNTAIN WORKS

Team of authors

Studies of methane tributaries from coal fired in the cleaning bottom are presented depending on its fractional composition, gas permeability and sorption parameters, gas pressure in the pore space and the length of stay on the bottom conveyor. A computer simulation of the mass transfer process based on the solution of the differential equation in the polar-symmetric formulation of the problem by finite element method is performed. A significant influence on the gas content of the number of small fractions has been established. The technological features of complex degassing of the developed coal bed at the stage of its preliminary degassing (PPD), carried out from mine workings in the process of preparation of the excavation site for intensive and safe working off, are presented.